

DOI: [10.7242/1999-6691/2013.6.4.53](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.4.53)

УДК 536.242:536.421

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В РЕАКТОРЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТОГО ТИТАНА

А.И. Цаплин, В.Н. Нечаев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Предложена математическая модель, описывающая динамику неравновесного тепло-массообмена в технологическом процессе магниетермического восстановления титана из его тетрахлорида. Для осесимметричной расчетной области в двухслойной системе, имеющей проницаемую границу между расплавом магния и пористым титаном, представлена постановка краевой задачи в переменных температура–завихренность–функция тока. Описан алгоритм вычислительного эксперимента. Приводятся результаты численного моделирования – поля температуры, функции тока, давления, с учетом сопряженных процессов на границе расплава магния с блоком титана.

Ключевые слова: пористый титан, расплав магния, тепло-массообмен, математическая модель

NUMERICAL MODELING OF NON-EQUILIBRIUM HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN A REACTOR FOR THE PRODUCTION OF POROUS TITANIUM

A.I. Tsaplin and V.N. Nechaev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

A mathematical model is proposed to describe the dynamics of non-equilibrium heat and mass transfer in the process of magnesium-thermal recovery of titanium from its tetrachloride. For the axially symmetric computational domain in the two-layer system with a permeable interface between the molten magnesium and the porous titanium, the boundary value problem is formulated in terms of temperature-vortex-stream function variables. An algorithm for performing computational experiments is described. With allowance made for conjugate processes at the interface between the molten magnesium and the titanium, the results of numerical simulation of the temperature field, stream function and pressure are presented.

Key words: porous titanium, molten magnesium, heat and mass transfer, mathematical model

1. Введение

В цветной металлургии широкое распространение получил способ магниетермического восстановления титана из его тетрахлорида. Способ основан на экзотермической реакции взаимодействия тетрахлорида титана (ТХТ) с расплавленным магнием, в результате которой ТХТ восстанавливается до губчатого титана с образованием побочного продукта — хлорида магния. В нашей стране имеются два предприятия-производителя губчатого титана, это — АВИСМА-филиал корпорации ВСМПО-АВИСМА (г. Березники) и Соликамский магниевый завод (г. Соликамск), на которых, как и во всей современной отечественной практике, используются аппараты с цикловым съемом 4,8 и 7,0 т губчатого титана. Аппараты имеют следующие геометрические размеры: внутренние диаметры 1,55 и 1,70 м и высоты 3,82 и 4,30 м соответственно. При температуре окружающей среды ТХТ в жидком виде подается в аппарат на поверхность разогретого до 750...800°C расплава магния, где одновременно вступает в экзотермическую реакцию с выделением тепла и испаряется, образуя газовую фазу внутри аппарата. Значения температуры в зоне протекания реакции могут превышать 1000°C, поэтому верхнюю часть аппарата охлаждают при одновременном подогреве его нижней части. Это вызывает значительные конвективные потоки в расплаве магния [1].

В результате химического взаимодействия в нижней части аппарата формируется блок губчатого титана с порами, заполненными жидким магнием с незначительным количеством примесей. Пористость губки, получаемой в промышленных аппаратах, колеблется в пределах 45...70% от ее кажущегося объема, радиусы пор имеют значения от 10 до 50 мкм; известна количественная связь между пористостью и удельным расходом ТХТ [2, 3]. Дальнейший передел в технологии получения губчатого титана связан с удалением из пор магния и хлористого магния. Эффективность этого процесса зависит от размеров и неоднородности пор в блоке. Производство титана сдерживается недостаточной производительностью и высокой стоимостью технологии [4]. Интенсификация магниетермического способа восстановления ТХТ предполагает контроль транспортировки реагентов в зону реакции, обеспечение отвода продуктов реакции и тепла, поддержание оптимального температурного режима в зоне реакции. Подробно технология получения титана изложена в соответствующей специальной литературе [5–7].

С целью управления технологическим процессом ставится задача прогнозирования динамики подачи ТХТ в реактор с расплавом магния для получения требуемой пористости губчатого титана. Ускоренное

решение этой задачи возможно на основе моделирования сопряженных неравновесных процессов тепломассопереноса как в расплаве магния, так и в блоке пористого титана. Известны работы, посвященные общим вопросам моделирования тепломассопереноса в пористых средах [8–11]. В работе [12] показана важная роль параметра Дарси при моделировании свободноконвективного течения около вертикальной поверхности в полубесконечной пористой среде. Естественная тепловая конвекция в составной прямоугольной области со слоями различной проницаемости исследовалась в работе [13] без учета диффузионного переноса. Известна формулировка условий, описывающих взаимодействие на границе контакта жидкости и проницаемой перегородки [14, 15], которые могут моделировать границу сопряжения жидкого магния и пористого титана.

В настоящей работе предлагается математическая модель, учитывающая нестационарные сопряженные процессы тепломассопереноса как в расплаве магния, так и в блоке пористого титана. Алгоритм ее численной реализации принимает во внимание фильтрацию жидкой фазы через пористую среду осаждаемого титана.

2. Постановка задачи. Определяющие уравнения и краевые условия

Схема аппарата и печи восстановления с цикловым съемом 4,8 т губчатого титана приведен на рисунке 1. Реторта аппарата восстановления имеет цилиндрическую форму. Процесс начинается с заливки реторты расплавом магния, в который периодически подаются порции жидкого ТХТ со средним массовым расходом M (кг/с). Появляющийся в результате химической реакции титан оседает в нижней части реторты, образуя твердый скелет с порами, заполненными расплавом магния с примесями.

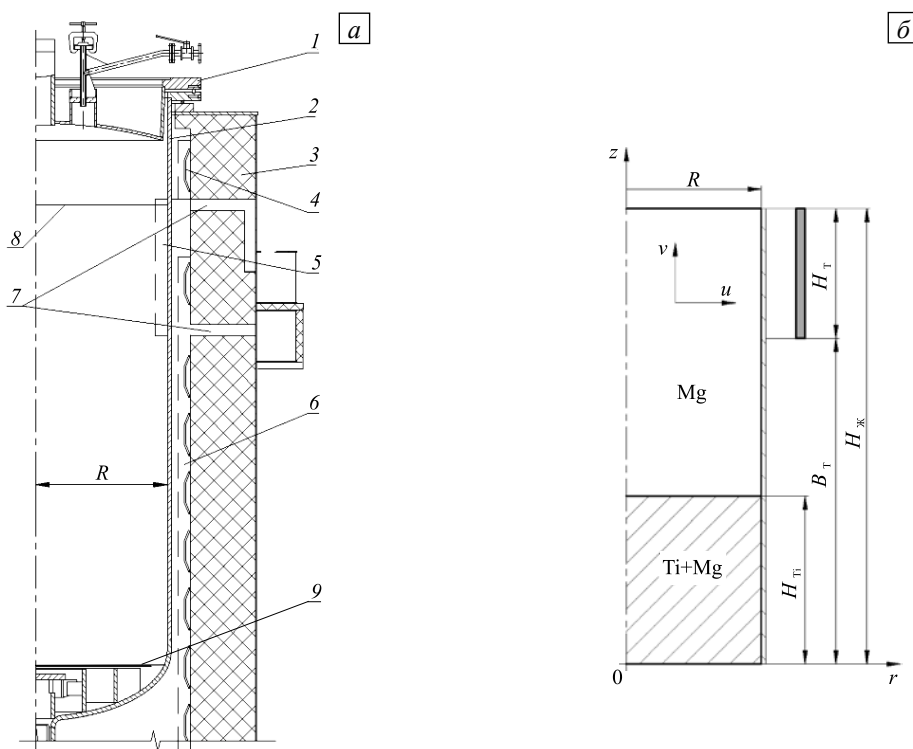


Рис. 1. Схема аппарата и печи восстановления (а): 1 – крышка, 2 – реторта, 3 – шахтная электропечь, 4 – верхний нагреватель, 5 – теплообменник (область охлаждения воздухом реторты в зоне реакции), 6 – нижний нагреватель, 7 – каналы печи для подачи и отвода охлаждающего воздуха, 8 – уровень расплава магния в реторте, 9 – решетка эллиптического днища; расчётная схема (б): $H_{\text{ж}}$ – уровень магния, $H_{\text{т}}$ – высота теплообменника, $B_{\text{т}}$ – расстояние от $z=0$ до теплообменника, R – внутренний радиус реторты, $H_{\text{т}}$ – высота блока губчатого титана

Представленная на этом же рисунке расчётная область имеет осевую симметрию, ограничена слева осью симметрии, справа — стенкой реторты, в нижней части — решёткой эллиптического днища, сверху — уровнем расплава в реторте. Расчётная область условно разбивается по высоте на две части: первая из них ($H_{\text{т}} < z < H_{\text{ж}}$) содержит расплав магния, вторая ($0 < z < H_{\text{т}}$) — пористый титан.

Математическая формулировка задачи тепловой конвекции в расплаве магния сводится к системе дифференциальных уравнений переноса тепловой энергии и импульса, а также уравнения несжимаемости, имеющих в обозначениях работ [16, 17] для осесимметричной области следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \chi_{Mg} \nabla^2 T, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v_{Mg} \nabla^2 u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v_{Mg} \nabla^2 v - g(1 - \beta T), \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad \nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (4)$$

При известном поле скоростей из уравнений (2), (3) можно получить уравнение Пуассона для поля давлений в расплаве магния

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \rho \beta g \frac{\partial T}{\partial z} - \nu \rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \rho \left(2 \frac{u^2}{r^2} - 2 \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial z} + 2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial z} \right). \quad (5)$$

Тепломассоперенос в титане с порами, заполненными расплавом магния, описывается системой дифференциальных уравнений [9, 16, 18]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \gamma \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \chi_{эф} \nabla^2 T, \quad \gamma = \frac{\rho_{Mg} c_{Mg}}{\rho_{Ti} c_{Ti} + m \rho_{Mg} c_{Mg}}, \quad \chi_{эф} = \frac{\lambda_{Ti}}{\rho_{Ti} c_{Ti} + m \rho_{Mg} c_{Mg}}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{m} \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{1}{m^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_{Mg}} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{v_{Mg}}{K} u + v_{Mg} \nabla^2 u, \quad (7)$$

$$\frac{1}{m} \frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{1}{m^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_{Mg}} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{v_{Mg}}{K} v + v_{Mg} \nabla^2 v - g(1 - \beta T), \quad (8)$$

$$v = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (9)$$

где T — температура; r, z, t — координаты и время; u, v — компоненты вектора скорости в проекциях на оси r и z соответственно; p — давление; ρ — плотность; c — массовая теплоёмкость; λ — коэффициент теплопроводности; μ, ν — соответственно коэффициенты динамической и кинематической вязкости; g — ускорение свободного падения; γ — безразмерный коэффициент; χ — температуропроводность; $m = V_{пор}/V$ — пористость титана, представляющая собой отношение объёма пор к объёму блока; K — проницаемость пористого титана, являющаяся динамической характеристикой пористой среды [8, 9, 19].

Перейдём в уравнениях (2), (3), (7), (8) к новым переменным завихренность–функция тока $(\omega - \psi)$ в соответствии с соотношениями

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \omega = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (10)$$

Для записи уравнений переноса (1)–(4) в безразмерном виде выберем в качестве масштабов следующие величины: L_0 — характерный линейный размер, τ_0 — время, $v_0 = \nu/L_0$ — скорость, $T_0, \Delta T$ — температуру, $\psi_0 = \nu$ — функцию тока, $\omega_0 = \nu/L_0^2$ — завихренность, p_0 — давление. В результате вместо (1)–(9) имеем системы уравнений для области с расплавом магния

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial r} + v \frac{\partial \omega}{\partial z} = \nabla^2 \omega + Gr \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (11)$$

$$\nabla^2 \psi = -\omega, \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{Pr} \nabla^2 T + R, \quad (13)$$

для области с пористым титаном

$$\frac{1}{m} \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \frac{1}{m^2} \left(u \frac{\partial \omega}{\partial r} + v \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) = \nabla^2 \omega - \frac{\omega}{\text{Da}} + \text{Gr} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (14)$$

$$\nabla^2 \psi = -\omega, \quad (15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \gamma \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{\text{Pr}_{\text{эф}}} \nabla^2 T, \quad (16)$$

а также уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{\text{Eu}} \left[\text{Gr} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{r} \text{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \left(2 \frac{u^2}{r^2} - 2 \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial z} + 2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right], \quad (17)$$

где $\text{Gr} = \beta g L_0^3 \Delta T / \nu^2$ — число Грасгофа, в котором ΔT — перепад температур в расплаве магния, $L_0 = H_{\text{ж}} - H_{\text{ти}}$ — высота слоя расплава магния; $\text{Pr} = \nu / \chi$ — число Прандтля, $\text{Da} = K / L_0^2$ — число Дарси; $\text{Eu} = \rho_0 / (\rho \nu_0^2)$ — число Эйлера; $\text{Re} = v_0 L_0 / \nu$ — число Рейнольдса. Турбулентные режимы перемешивания в расплаве магния учтём путём введения турбулентной вязкости $\nu_{\tau} = 2 \cdot 10^{-3} \nu \cdot \text{Re}$ и турбулентной теплопроводности $\chi_{\tau} = \nu_{\tau} \cdot \text{Pr}^{-1/3}$ [17].

В начальный момент времени расчётная область характеризуется параметрами состояния изотермического равновесного расплава магния

$$r, z, \tau = 0: \quad T = T_0, \quad \omega = \psi = 0, \quad (18)$$

где T_0 — температура расплава магния в реторте в начальный момент времени.

Зададим следующие граничные условия теплообмена:
на верхней границе

$$z = H_{\text{ж}}: \quad -\frac{\partial T}{\partial z} = R_{\text{вг}}, \quad R_{\text{вг}} = [(Q_{\text{экз}} - Q_{\text{исп}})M + N_{\text{вн}}] L_0 / (\pi R^2 \lambda T_0); \quad (19)$$

в зоне теплообменника при обдуве реторты воздухом

$$B_{\tau} \leq z \leq H_{\text{ж}}: \quad -\frac{\partial T}{\partial r} = \text{Nu} (T - T_c / T_0), \quad \text{Nu} = \alpha L_0 / \lambda_{\text{в}}; \quad (20)$$

в зоне нижнего нагревателя

$$0 \leq z < B_{\tau}: \quad -\frac{\partial T}{\partial r} = R_{\text{нн}}, \quad R_{\text{нн}} = N_{\text{нн}} L_0 / (2\pi R T_0 \lambda H_{\text{нн}}); \quad (21)$$

на нижней границе

$$0 \leq r \leq R: \quad \frac{\partial T}{\partial z} = R_{\text{нг}}, \quad R_{\text{нг}} = N_{\text{нг}} L_0 / (\pi R^2 \lambda T_0); \quad (22)$$

на оси симметрии

$$0 \leq z \leq H_{\text{ж}}: \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (23)$$

где $R_{\text{вг}}, R_{\text{нн}}, R_{\text{нг}}$ — безразмерные характеристики тепловых потоков, соответственно, на верхней границе, в зоне нижнего нагревателя, на нижней границе; $N_{\text{вн}}, N_{\text{нн}}, N_{\text{нг}}$ — мощности верхнего, нижнего нагревателей и нагревателя на нижней границе; Nu — число Нуссельта; α — коэффициент теплоотдачи; $\lambda_{\text{в}}$ — коэффициент теплопроводности воздуха; $Q_{\text{экз}}, Q_{\text{исп}}$ — теплота экзотермической реакции ТХТ с магнием и теплота испарения продуктов реакции; M — средний массовый секундный расход ТХТ; R — внутренний радиус реторты; T_c — температура окружающей среды; $H_{\text{нн}}$ — высота нижнего нагревателя.

На проницаемой границе пористого титана с расплавом магния ($z = H_{\text{ти}} / L_0$) должна соблюдаться непрерывность температуры

$$T_{Mg}(r) = T_{Ti}(r) \tag{24}$$

и поперечной компоненты скорости [14, 15]; при равенстве скоростей на этой границе безразмерная функция тока принимает вид

$$\psi = \frac{Da}{Eu} \int_0^r \frac{\partial p}{\partial z} dr \tag{25}$$

3. Метод решения

Процедура решения сопряжённой задачи неравновесного тепломассопереноса в реакторе для получения пористого титана (10)–(17) с краевыми условиями (18)–(25) сводится к итерационному процессу. В каждой из подобластей с расплавом магния и пористого титана система $\omega - \psi - T$ -уравнений решается последовательно до удовлетворения с наперёд заданной точностью условиям сопряжения (24), (25) на проницаемой границе. Используемый алгоритм решения задачи в подобласти на регулярной сетке описан ранее в работе [17] и включает расщепление уравнений переноса по методу продольно-поперечной прогонки, а также решение уравнений Пуассона методом последовательной линейной верхней релаксации.

Адекватность разработанной математической модели и метода её реализации показаны в работе [20] при описании неравновесного процесса тепломассопереноса вязкой жидкости. Параметрические расчёты для прямоугольной области продемонстрировали уменьшение погрешности при сгущении регулярной сетки: при числе разбиений $N \times M = 70 \times 114$ погрешность не превысила 3,9%.

4. Результаты численного исследования

Численное исследование тепломассопереноса в промышленном аппарате проводилось при фиксированных значениях следующих параметров:

- геометрических — $R = 0,775$ м, $H_{ж} = 2,560$ м, $H_{Ti} = 1$ м, $B_T = 1,787$ м, $H_T = 0,772$ м;
- мощности нагревателей и безразмерных характеристик тепловых потоков — $N_{вн} = 47$ Вт, $N_{нн} = 282$ Вт, $N_{нт} = 94$ Вт, $R_{вг} = 0,544$, $R_{нн} = 0,179$, $R_{нт} = 3,137$;
- теплоты экзотермической реакции и испарения — $Q_{экс} = 642,4$ кДж/кг, $Q_{исп} = 188,180$ кДж/кг;
- масштабов температуры: $T_0 = 700$ °С, $\Delta T = 50$ °С;
- масштаба давления: $p_0 = 101,4$ Па;
- среднего расхода ТХТ — $M = 0,0889$ кг/с;
- характеристик пористого титана — $m = 0,7$; $K = 14,6 \cdot 10^{-12}$ м²;
- теплофизических свойства металлов при температурах 650...700°С (см. Табл. [6, 7, 21–23]);
- характеристик теплообмена — $T_c = 20$ °С, $\lambda_B = 0,0271$ Вт/(м·К).

В этих условиях безразмерные числа составляют:

$$Gr = \beta g L_0^3 \Delta T / \nu^2 = 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 2,559^3 \cdot 50 / (0,7 \cdot 10^{-6})^2 = 6,4 \cdot 10^{12}; \quad Pr = \nu / \chi = (0,7 \cdot 10^{-6}) / (4,48 \cdot 10^{-6}) = 0,16;$$

$$Da = K / L_0^2 = 14,6 \cdot 10^{-12} / 2,559^2 = 2,2 \cdot 10^{-12}; \quad Eu = p_0 / (\rho v_0^2) = 101,4 / (1576 \cdot 0,1^2) = 6,4;$$

$$Re = v_0 L_0 / \nu = (0,1 \cdot 2,559) / (0,7 \cdot 10^{-6}) = 3,6 \cdot 10^5; \quad Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8} = 0,018 \cdot (365,571 \cdot 10^3)^{0,8} = 508.$$

При перечисленных начальных и граничных условиях проведены расчёты тепломассопереноса в реторте с магнием и губчатым титаном, поры которого заполнял магний. На рисунке 2 представлены

Таблица. Теплофизические свойства металлов (даны при 700°С)

№ пп	Параметр	Обозначение, размерность	Числовое значение	
			Mg	Ti
1	Температура плавления	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	650	1668
2	Плотность	$\rho, \text{ кг/м}^3$	1576	4382
3	Коэффициент теплопроводности	$\lambda, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	97,7	19,5
4	Теплоемкость	$c, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	1,344	0,655
5	Вязкость	$\mu, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	–
6	Коэффициент объемного расширения	$\beta, \text{ К}^{-1}$	$0,38 \cdot 10^{-3}$	–

результаты численного решения в условиях свободной конвекции расплава магния в подобласти высотой $H_{Ti} < z < H_{ж}$ в первом приближении, не учитывающем проницаемость нижней границы.

В условиях теплообмена, когда в верхней части реторты выделяется тепло экзотермической реакции с одновременным воздушным охлаждением стенки реторты, а нижняя её часть подогревается, возникает двухвихревая циркуляция расплава (Рис. 2, б). В зоне действия теплообменника встречаются нисходящий (охлажденный у стенки реторты) и восходящий (подогретый) потоки расплава. Двухконтурное движение жидкости вызывает изгиб изотерм в средней части расчётной области, где наблюдаются горизонтальные участки, совпадающие с направлением потоков жидкой фазы. Наибольшие температурные градиенты отмечаются у правой границы расчётной области, а также на поверхности расплава магния в зоне экзотермической реакции с тетрахлоридом титана (Рис. 2, а).

Циркуляция расплава магния приводит к неоднородному распределению избыточного давления (Рис. 3). В результате на границе расплава магния с пористым титаном избыточное давление меняет знак, а неоднородное распределение функции тока характеризует проницаемость границы (Рис. 4). Полученные распределения температуры и функции тока на нижней границе подобласти с расплавом магния использовались в качестве верхнего граничного условия при решении задачи в подобласти с пористым титаном.

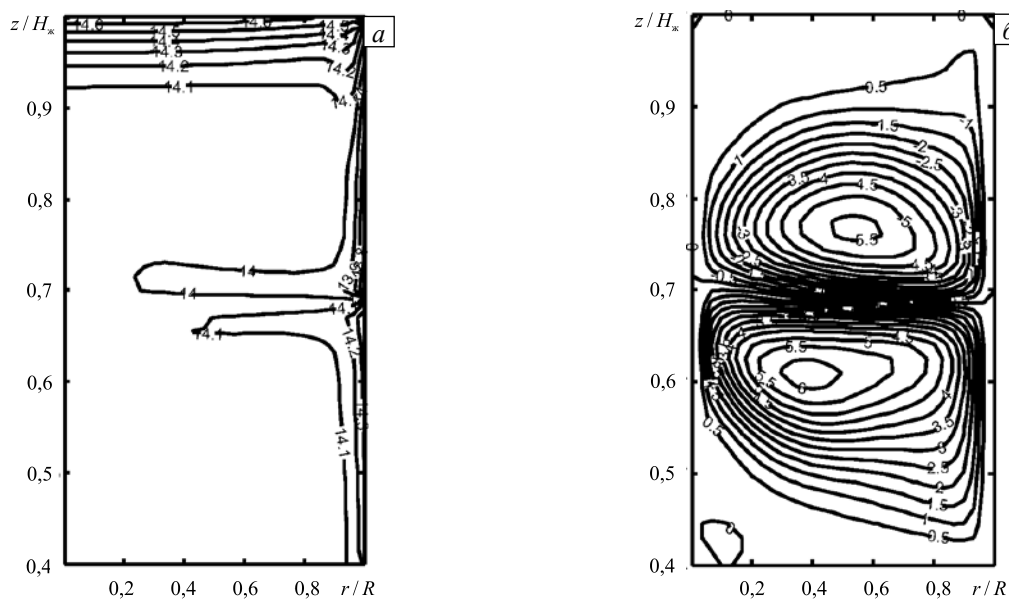


Рис. 2. Расчётные изотермы (а) и линии тока $\psi \cdot 10^{-3}$ (б) в условиях свободной конвекции в подобласти, заполненной магнием

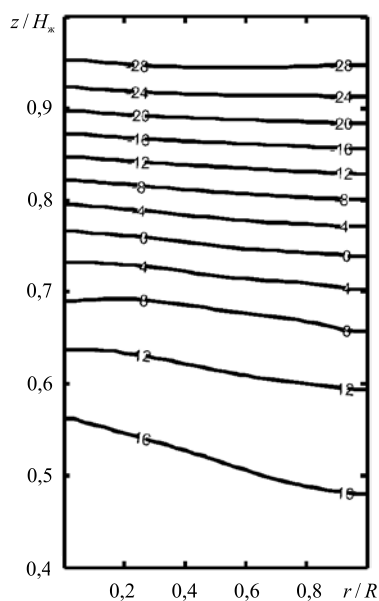


Рис. 3. Распределение давления в подобласти с расплавом магния

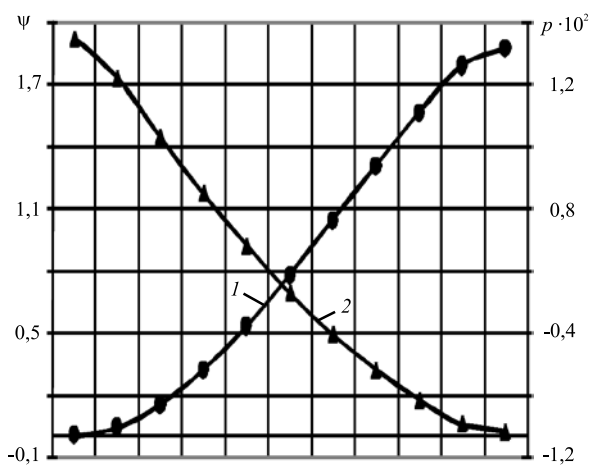


Рис. 4. Распределение функции тока (кривая 1) и давления (2) на проницаемой границе между пористым титаном и расплавом магния

На рисунке 5 представлены результаты решения сопряжённой задачи в расчётной области, включающей подобласти расплава магния и пористого титана. В подобласти с расплавом магния сохранилась двухвихревая структура, полученная при расчёте в первом приближении (Рис. 2, б). Интенсивность конвективного переноса расплава магния в порах губчатого титана оказалась на четыре порядка ниже, чем при свободном течении расплава. Это говорит о том, что теплоперенос в подобласти, заполненной титаном, происходит по диффузионному механизму: изотермы в этой части расчётной области не имеют резких перегибов, характерных для изотерм в расплаве магния в условиях свободной конвекции. Фильтрация расплава через проницаемую границу незначительна, поскольку сформированный блок губчатого титана проявляет большое сопротивление переносу расплава в нижнюю часть аппарата.

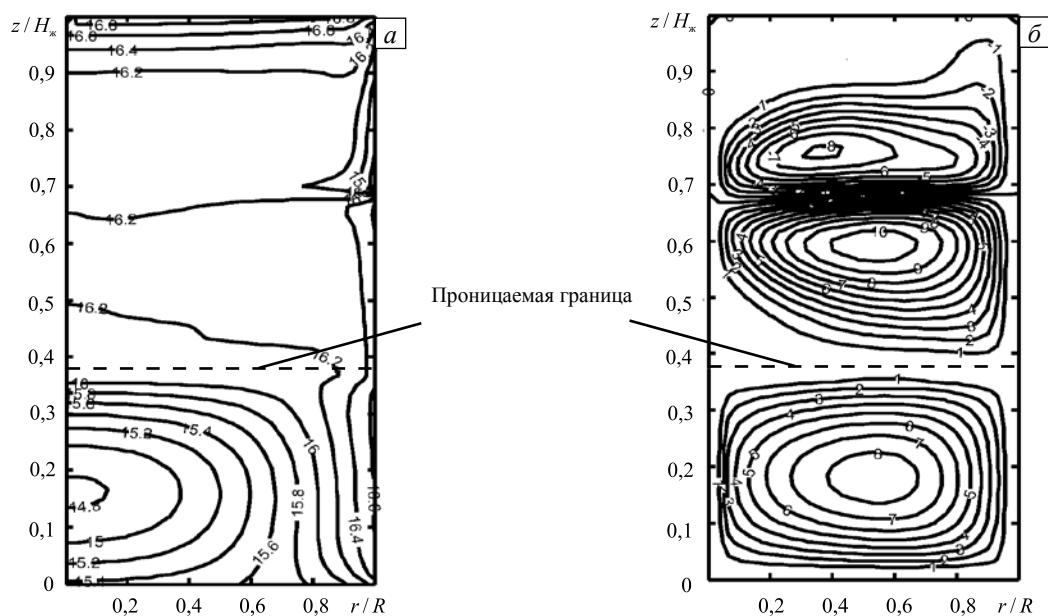


Рис. 5. Расчётные изотермы (а) и линии тока (б) в реакторе с расплавом магния ($\psi \cdot 10^{-3}$) и пористым титаном ($\psi \cdot 10$)

5. Заключение

Разработана математическая модель и компьютерная программа, адекватно описывающие неравновесные теплофизические процессы в реакторе аппарата для получения пористого титана. Для существующей технологии проведен численный анализ, характеризующий тепловую и гидродинамическую обстановку в реакторе с учетом фильтрации жидкой фазы через пористую среду осаждаемого титана.

Представленная математическая модель может оказаться полезной для прогнозирования динамики загрузки компонентов, условий теплообмена, обеспечивающих экономию энергоресурсов при максимальной производительности процесса получения титана.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-96004-р_урал_a).

Литература

1. Нечаев В.Н., Цаплин А.И. Моделирование гидродинамических явлений в реакторе получения губчатого титана // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 25-33.
2. Власов В.В. Изучение влияния параметров процессов восстановления и сепарации на структуру губчатого титана и полноту очистки его от хлорсодержащих примесей: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Л., ВАМИ, 1968. – 16 с.
3. Скрыпнюк В.М., Родякин В.В., Кушкин Б.М. Пористость губчатого титана // Металлургия и химия титана. – М.: Металлургия, 1970. – Т. 4. – С. 93-97.
4. Листопад Д.А. Усовершенствование магнетермического процесса получения титана губчатого с целью снижения поступления примесей // ТАРП. – 2012. – Т. 3, № 1 (5). – С. 13-14.
5. Руссо В.Л. Теплофизика металлургических гарнисажных аппаратов. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
6. Гармата В.А., Петрунько А.Н., Галицкий Н.В. и др. Титан. – М.: Металлургия, 1983. – 559 с.
7. Тарасов А.В. Металлургия титана: Учеб. пособие. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 328 с.
8. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М.-Л.: ОГИЗ-Гостехиздат, 1947. – 244 с.
9. Баренблатт Г.И., Енгов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1984. – 212 с.
10. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. – 628 с.
11. Nield D.A., Bejan A. Convection in porous media. – New York: Springer, 1999. – 546 p.
12. Бочарова А.А., Плаксина И.В. Влияние границы на свободноконвективное течение в пористой среде при заданной теплоотдаче с вертикальной поверхностью // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 5-12. [DOI](#)

13. *Bahadori F., Rashidi F.* CFD simulation of temperature dependent viscosity under free convection through two-layered porous media // Contemporary Engineering Sciences. – 2012. – V. 5, N. 2. – P. 67-74.
14. *Бирих Р.В., Рудаков Р.Н., Трусов П.В., Швейкин А.И.* Линейные задачи теории гидродинамической устойчивости: Учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 99 с.
15. *Колчанова Е.А., Любимов Д.В., Любимова Т.П.* Влияние эффективной проницаемости среды на устойчивость двухслойной системы «однородная жидкость – пористая среда» в поле вибраций высокой частоты // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 225-232. [DOI](#)
16. *Цаплин А.И.* Теплофизика в металлургии: Учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 230 с.
17. *Цаплин А.И.* Теплофизика внешних воздействий при кристаллизации стальных слитков на машинах непрерывного литья. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1995. – 238 с.
18. *Prakash J., Gupta S.K.* Characterization of thermohaline convection in porous medium: Brinkman model // IJERA. – 2012. – V. 2, N. 6. – P. 1082-1087.
19. *Бернадинер М.Г., Ентов М.Н.* Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей. – М.: Наука, 1975. – 200 с.
20. *Нечаев В.Н., Цаплин А.И.* Моделирование тепломассопереноса вязкой жидкости в прямоугольной области // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 3. – С. 47-55.
21. *Эйдензон М.А.* Магний. – М.: Металлургия. – 1969. – 352 с.
22. *Бабиков А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др.* Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
23. *Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е.* Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

References

1. *Nechaev V.N., Tsaplin A.I.* Modelirovanie gidrodinamicheskikh iavlenii v reaktore polucheniia gubchatogo titana // Vestnik PNIPIU. Mashinostroenie, materialovedenie. – 2012. – Т. 14, N. 4. – С. 25-33.
2. *Vlasov V.V.* Izucheniie vliianiia parametrov vosstanovleniia i separatsii na strukturu gubchatogo titana i polnotu ochistki ego ot khlorosoderzhashchikh primesei: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. – L., VAMI, 1968. – 16 s.
3. *Skrypnik V.M., Rodiakin V.V., Kushkin B.M.* Poristost' gubchatogo titana // Metallurgiiia i khimiiia titana. – М.: Metallurgiiia, 1970. – Т. 4. – С. 93-97.
4. *Listopad D.A.* Uovershenstvovanie magnietermicheskogo protsessa polucheniia titana gubchatogo s tsel'iu snizheniia postupleniia primesei // TARP. – 2012. – Т. 3, N. 1 (5). – С. 13-14.
5. *Russo V.L.* Teplofizika metallurgicheskikh garnisazhnykh apparatov. – М.: Metallurgiiia, 1978. – 248 s.
6. *Garmata V.A., Petrun'ko A.N., Galitskii N.V. i dr.* Titan. – М.: Metallurgiiia, 1983. – 559 s.
7. *Tarasov A.V.* Metallurgiiia titana: Ucheb. posobie. – М.: IKTs «Akademkniga», 2003. – 328 s.
8. *Leibenzon L.S.* Dvizhenie prirodnykh zhidkosti i gazov v poristoi srede. – М.-Л.: OGIZ-Gostekhizdat, 1947. – 244 s.
9. *Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M.* Dvizhenie zhidkosti i gazov v prirodnykh plastakh. – М.: Nedra, 1984. – 212 s.
10. *Masket M.* Techenie odnorodnykh zhidkosti v poristoi srede. – М.-Izhevsk: NITs «Reguliarnaia i khaoticheskaia dinamika», 2004. – 628 s.
11. *Nield D.A., Bejan A.* Convection in porous media. – New York: Springer, 1999. – 546 p.
12. *Bocharova A.A., Plaksina I.V.* Vliianie granitsy na svobodnokonvektivnoie techenie v poristoi srede pri zadannoii teplootdache s vertikal'noi poverkhnosti // Vychisl. mekh. splosh. sred. – 2011. – Т. 4, N. 3. – С. 5-12. [DOI](#)
13. *Bahadori F., Rashidi F.* CFD simulation of temperature dependent viscosity under free convection through two-layered porous media // Contemporary Engineering Sciences. – 2012. – V. 5, N. 2. – P. 67-74.
14. *Birikh R.V., Rudakov R.N., Trusov P.V., Shveikin A.I.* Lineinye zadachi teorii gidrodinamicheskoi ustoichivosti: Ucheb. posobie. – Perm': Izd-vo PGTU, 2008. – 99 s.
15. *Kolchanova E.A., Liubimov D.V., Liubimova T.P.* Vliianie effektivnoi pronitsaemosti sredy na ustoichivost' dvukhsloinoi sistemy «odnorodnaia zhidkost' – poristaia sreda» v pole vibratsii vysokoi chastoty // Vychisl. mekh. splosh. sred. – 2012. – Т. 5, N. 2. – С. 225-232. [DOI](#)
16. *Tsaplin A.I.* Teplofizika v metallurgii: Ucheb. posobie. – Perm': Izd-vo PGTU, 2008. – 230 s.
17. *Tsaplin A.I.* Teplofizika vneshnikh vozdeistvii pri kristallizatsii stal'nykh slitkov na mashinakh nepreryvnogo lit'ia. – Ekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 1995. – 238 s.
18. *Prakash J., Gupta S.K.* Characterization of thermohaline convection in porous medium: Brinkman model // IJERA. – 2012. – V. 2, N. 6. – P. 1082-1087.
19. *Bernadiner M.G., Entov M.N.* Gidrodinamicheskaiia teoriia fil'tratsii anomal'nykh zhidkosti. – М.: Nauka, 1975. – 200 s.
20. *Nechaev V.N., Tsaplin A.I.* Modelirovanie teplomassoperenosa viazkoii zhidkosti v priamougol'noi oblasti // Vestnik PNIPIU. Mashinostroenie, materialovedenie. – 2013. – Т. 15, N. 3. – С. 47-55.
21. *Eidenzon M.A.* Magnii. – М.: Metallurgiiia. – 1969. – 352 s.
22. *Babikov A.P., Babushkina N.A., Bratkovskii A.M. i dr.* Fizicheskie velichiny: Spravochnik / Pod red. I.S. Grigor'eva, E.Z. Meilikhova. – М.: Energoatomizdat, 1991. – 1232 s.
23. *Vargaftik N.B., Filippov L.P., Tarzimanov A.A., Totkii E.E.* Spravochnik po teploprovodnosti zhidkosti i gazov. – М.: Energoatomizdat, 1990. – 352 s.

Поступила в редакцию 26.11.13; опубликована в электронном виде 27.12.13

Сведения об авторах

Цаплин Алексей Иванович, д.тн, проф., зав.каф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, Пермь, Комсомольский пр., д. 29; E-mail: tai@pstu.ru

Нечаев Владимир Николаевич, асп., ПНИПУ; E-mail: nechvladimir@yandex.ru